

DOI: 15593/2224-9877/2017.2.07

УДК 62-26

А.В. Щенятский, М.А. Котельников, А.А. БашароваИжевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова,
Ижевск, Россия

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА

В работе представлены основные требования к гироскопам. Определены преимущества твердотельных волновых гироскопов по сравнению с другими конструкциями. Особое внимание уделено твердотельным волновым гироскопам со стержневым чувствительным элементом. Рассмотрена конструкция всего изделия, устройство его основных элементов, принцип действия предлагаемого гироскопа и способ определения угловой скорости. Установлены факторы, влияющие на технические характеристики твердотельного волнового гироскопа со стержневым чувствительным элементом. Приведено обоснование выбора наиболее значимых для твердотельного волнового гироскопа конструктивных факторов. Исследования проводились в пять этапов с помощью пакета ANSYS. На первом этапе работы рассматривается влияние множества конструктивных факторов чувствительного элемента на такие технические характеристики резонатора, как частота собственных колебаний, амплитуда отклонений ножки резонатора, напряженно-деформированное состояние элементов конструкции. Материал резонатора и его свойства при проведении исследований остаются неизменными. На втором этапе исследовано влияние высоты диска на частоты собственных колебаний резонатора. Представлены результаты исследований и полученный график линейной зависимости собственной частоты резонатора от отношения высоты диска к диаметру стержня. На третьем этапе исследований определено влияние волновой формы поверхности диска на технические характеристики изделия. Установлены нелинейные зависимости собственной частоты и амплитуды перемещений ножки резонатора от числа волн на диске чувствительного элемента. На четвертом этапе установлено влияние положения волны на диске на технические характеристики резонатора. На пятом этапе установлено отклонение технических характеристик резонатора от погрешности изготовления диска. Представлены результаты расчетов и полученные геометрические зависимости технических параметров от изменения конструкции чувствительного элемента. Дано обоснование выбора сочетаний геометрических параметров. В конце статьи приведен вывод о том, что, изменяя жесткость диска, можно увеличить величину отклонения ножки резонатора и тем самым снизить влияние погрешностей изготовления на технические характеристики прибора в целом.

Ключевые слова: чувствительный элемент, стержневой чувствительный элемент, твердотельный волновой гироскоп, резонатор, конструктивные параметры, технические характеристики, собственная частота резонатора, амплитуда отклонения, моды колебаний, отклонения ножки резонатора, волновая форма диска, толщина диска.

A.V. Shchenyatskiy, M.A. Kotelnikov, A.A. Basharova

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation

INFLUENCE OF DESIGN DATA OF A SENSITIVE ELEMENT ON TECHNICAL CHARACTERISTICS OF A SOLID-STATE WAVE GYROSCOPE

The paper presents the basic requirements for gyroscopes. The advantages of solid-state wave gyroscopes are compared with other designs. Particular attention is paid to solid-state wave gyroscopes with a rod sensitive element. The design of the entire product, the structure of its basic elements, the principle of operation of the proposed gyroscope and the method for determining the angular velocity are considered. Factors influencing the technical characteristics of a solid-state wave gyro with a rod sensitive element are established. The substantiation of the choice of constructive factors that are most significant for solid-state wave gyroscope is given. The research was conducted in five stages using the ANSYS package. At the first stage of the work, the influence of a number of constructive factors of the sensitive element on such technical characteristics of the resonator as the frequency of natural oscillations, the amplitude of the deviations of the resonator leg, and the stress-strain state of the structural elements are considered. The resonator material and its properties remain unchanged during the research. At the second stage, the influence of the height of the disk on the natural frequencies of the resonator is investigated. The results of the research and the graph of the linear dependence of the natural frequency of the resonator on the ratio of disk height to the diameter of the rod are presented. At the third stage of the investigation, the effect of the waveform of the disc surface on the technical characteristics of the product was determined. The nonlinear dependences of the natural frequency and the amplitude of the displacements of the resonator leg on the number of waves on the disk are determined. In the fourth stage, the influence of the position of the wave on the disk on the technical characteristics of the resonator is established. At the fifth stage, the deviation of the technical characteristics of the resonator from the error in the manufacture of the disc is established. The results of calculations and the obtained geometrical dependences of technical parameters on the design of the sensitive element are presented. The rationale for the choice of combinations of geometric parameters is given. At the end of the article, it is concluded that by changing the rigidity of the disk, it is possible to increase the deviation of the resonator leg and thereby reduce the effect of manufacturing errors on the technical characteristics of the instrument as a whole. The list of literature consists of eight sources.

Keywords: Sensitive element, rod sensor, solid-state wave gyro, resonator, design parameters, technical characteristics, natural frequency of the resonator, amplitude of deviation, modes of oscillation, deviations of the resonator leg, wave form of a disk, disc thickness.

Введение

Твердотельные волновые гироскопы (ТВГ) широко применяются в различных областях науки и техники благодаря возможности быстро выходить на рабочий режим, высокой надежности и разрешающей способности при незначительных дрейфах изделия [1, 2]. Разработкой и совершенствованием конструкций ТВГ занимаются такие компании, как ОАО ПНППК, АО ИЭМЗ «Купол», а также французская акционерная компания Sagem.

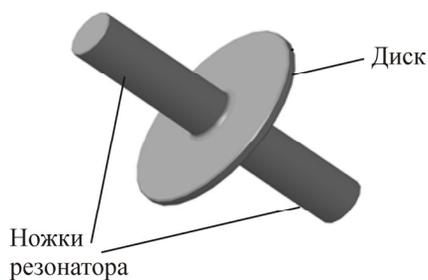


Рис. 1. Объемная модель стержневого ЧЭ

Одним из направлений совершенствования конструкций ТВГ является применение нового по конструкции стержневого чувствительного элемента (СЧЭ) [3]. Основное преимущество ТВГ со стержневым чувствительным элементом (резонатором) перед ТВГ с полусферическим резонатором заключается в том, что он технологичнее в изготовлении и экономически более целесообразен в производстве.

Главное его преимущество в том, что не требуется создавать глубоковакуумный корпус, как у ТВГ с полусферическим резонатором, что значительно снижает издержки производства и себестоимость конструкции в целом. На рис. 1 представлена объемная модель чувствительного элемента (ЧЭ) предлагаемая к рассматриваемому типу гироскопа.

Принцип работы и конструкция ТВГ со стержневым резонатором

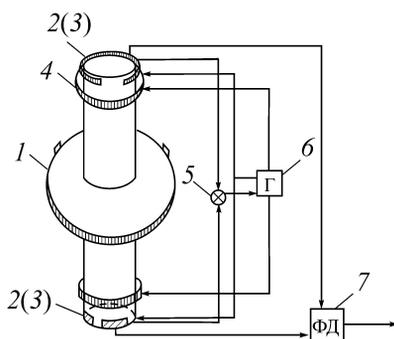


Рис. 2. Конструкция СЧЭ ТВГ: 1 – стержневой резонатор из кварцевого стекла, напыленный тонким слоем хрома; 2 – емкостные датчики, служащие для определения положения ножек; 3 – позиционные емкостные датчики, предназначенные для начального возбуждения; 4 – параметрический датчик, устанавливаемый с целью поддержания заданной амплитуды колебаний, представляющий из себя кольцевой электрод; 5 – сумматор; 6 – генератор управляющего и поддерживающего сигналов для возбуждения и поддержания колебаний резонатора; 7 – фазовый детектор для выделения полезного сигнала

В рассматриваемом ТВГ применен принцип разделения по времени, т.е. позиционный электрод и датчик угла выполнены в виде одного узла, но работают по своему предназначению в разные моменты времени.

Система съема информации (возбуждения) представляет из себя устройство из четырех равных по площади электродов.

Резонатор выполнен из высокодобротного материала – плавленого кварца. Кольцевой и позиционные электроды распложены на основании, в котором закреплен чувствительный элемент.

Принцип действия рассматриваемого гироскопа основан на следующем. В первоначальный момент времени электроды возбуждения прикладывают на ножки резонатора переменную силу с резонансной частотой, возбуждая тем самым колебания резонатора. Через некоторый промежуток времени, как только ножка вышла из положения равновесия, электроды переключаются в режим съема сигнала и работают в этом режиме до конца работы СТВГ. В это же время в работу включается параметрический электрод, который возбуждает ножку до определенной амплитуды и поддерживает ее в течение всей работы [4–6].

Предположим, что возникла входная угловая скорость (рис. 3), тогда колеблющиеся точки будут совершать сложное движение, в результате которого возникнет ускорение Кориолиса, а как следствие, момент от кориолисовых сил. Этот момент будет поворачивать ножку на угол, пропорциональный изменению входной угловой скорости. Тогда, имея сведения об этом угле, можно узнать относительную угловую скорость объекта. Точность измерения угла будет тем выше, чем большие значения будут иметь перемещения (амплитуды отклонения) точек ножки резонатора.

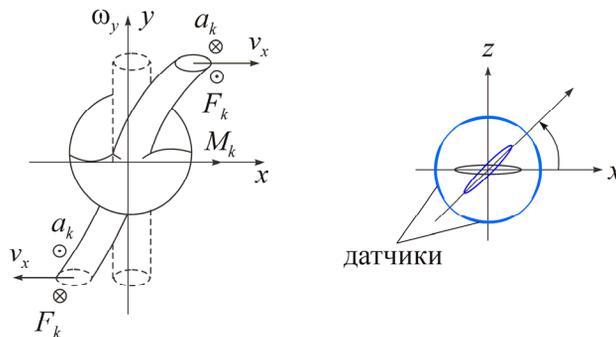


Рис. 3. Пояснение принципа работы ТВГ с СЭ

Вторым дополнительным преимуществом ТВГ со стержневым резонатором перед ТВГ с полусферическим резонатором является более простая геометрическая форма. Со стороны точностных показателей, как показали предварительно проведенные расчеты, новая конструкция не будет уступать гироскопу с полусферическим резонатором. Недостатком является то, что данный тип ЧЭ мало изучен, поэтому в первую очередь необходимо провести анализ влияния конструктивных, в том числе и геометрических, параметров на такие технические характеристики, как собственные частоты колебаний и амплитуды отклонений [7–10].

В статье представлены результаты исследования диска чувствительного элемента. На основании результатов обоснованы оптимальная толщина и сочетание геометрических параметров.

Исследования влияния различных конструктивных параметров на технические характеристики выполнялись в следующей последовательности [11].

На первом этапе на основе анализа известных конструкций и предшествующих предварительных расчетов определялся круг факторов, оказывающих влияние на технические параметры ТВГ. В результате зависимость собственной частоты от конструктивных параметров в общем виде может быть представлена уравнением

$$f = (\gamma, E, \mu, \sigma, L, D, d, h, T, z, d_z),$$

где γ – плотность материала; E – модуль упругости материала резонатора; μ – коэффициент внутреннего трения; σ – предел прочности материала резонатора, МПа; L – длина ножки резонатора, мм; D – диаметр ножки резонатора, мм; d – диаметр диска, мм; H – высота диска, мм; T – шаг волны диска, мм; z – число волн на диске; d_z – расстояние до центра волны на диске, мм.

В работе будем рассматривать резонатор из одного материала, следовательно, такие параметры, как плотность материала, модуль упругости, предел прочности, коэффициент Пуассона, коэффициент внутреннего трения (табл. 1) будут постоянны. В качестве переменных параметров останутся высота диска, число волн на диске, расстояние до центра волны на диске и шаг волны.

На втором этапе рассматривалось изменение собственной частоты при переменной высоте диска, а также за счет изменения конструк-

ции диска. Анализ проводился в САЕ ANSYS. Модель стержневого резонатора с реальными размерами представлена на рис. 4. Материалом резонатора выберем кварцевое стекло с характеристиками, занесенными в табл. 1. По полученным результатам построим графики и сделаем вывод об оптимальной высоте диска, проанализируем необходимость введения изменения геометрии диска. В качестве исходных данных примем значения времени становления в рабочий режим гироскопа, опираясь на ТЗ.

Таблица 1

Характеристики кварцевого стекла

№ п/п	Наименование	Значение
1	Плотность	2,2 гр/см ³
2	Модуль Юнга	$7,5 \cdot 10^{10}$ Н/м ²
3	Коэффициент Пуассона	0,19
4	Предел прочности	39 МПа
5	Коэффициент внутреннего трения	10^{-4}

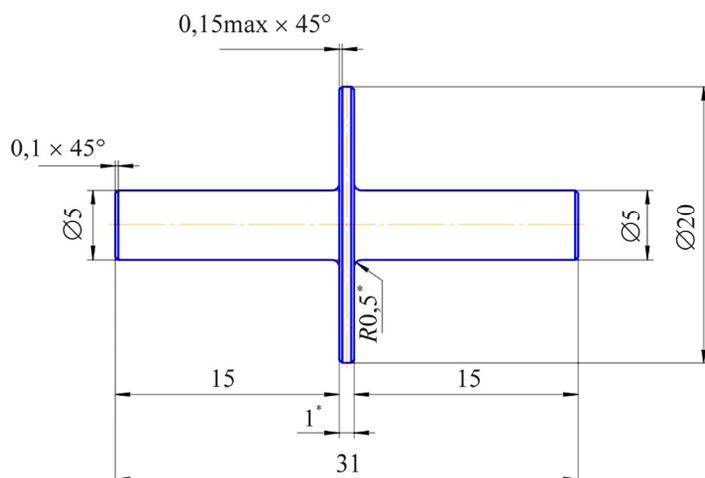


Рис. 4. Эскиз резонатора

В датчике резонатор закрепляется за диск, а подвижными элементами будут являться ножки резонатора, поэтому в программе фиксируем диск. Крепление диска обеспечивает неподвижность поверхностей в области прижима в радиальном, окружном и осевом направлениях. Поворот также невозможен. Исходя из вышесказанного проводим анализ. Для получения более достоверной информации при моделировании и проведении расчетов выполняем сгущение сетки конечных элементов в зонах изменения геометрии [12–14]. Наименьший размер конечного элемента составляет 0,1 мм.

Ниже представлены резонаторы (рис. 5, а, б) с высотой дисков 0,5 и 1,5 мм, промежуточные значения на рисунках не представлены, так как не несут информации.

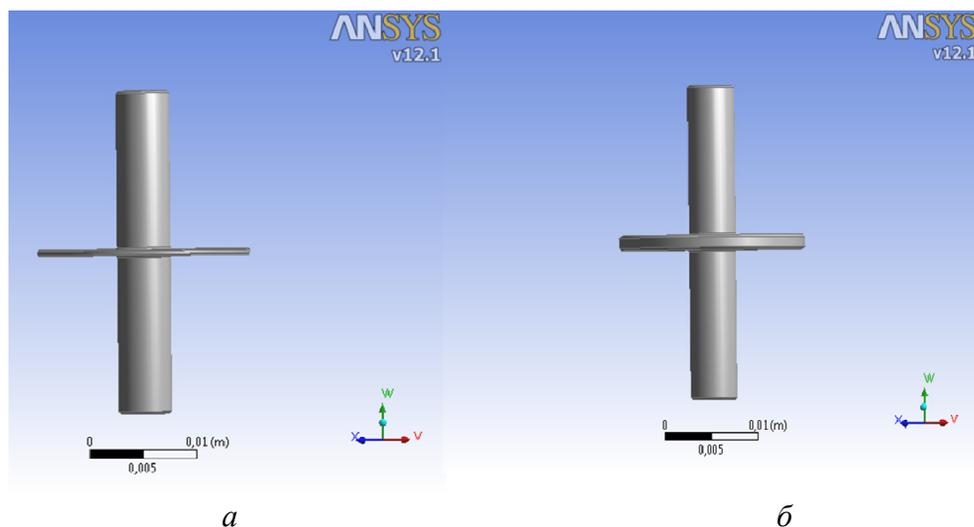


Рис. 5. Резонаторы: а – высота диска 0,5 мм; б – высота диска 1,5 мм

Был проведен анализ путем изменения высоты диска от 0,5 до 1,5 мм с шагом 0,25 мм. По результатам анализа, приведенным в табл. 2, выяснилось, что с увеличением высоты диска собственная частота резонатора увеличивается по линейному закону (рис. 6). Исходя из требований ТЗ выбираем высоту, равную 1 мм, остальные значения не удовлетворяют требованиям ТЗ.

Таблица 2

Результаты анализа влияния высоты диска
на собственные частоты резонатора

Высота диска H , мм	Отношение высоты диска к диаметру стержня H/D	Измеренная собственная частота резонатора γ , Гц
0,5	0,1	2224
0,75	0,15	3780,9
1	0,2	5560
1,25	0,25	6861,6
1,5	0,3	8208,2

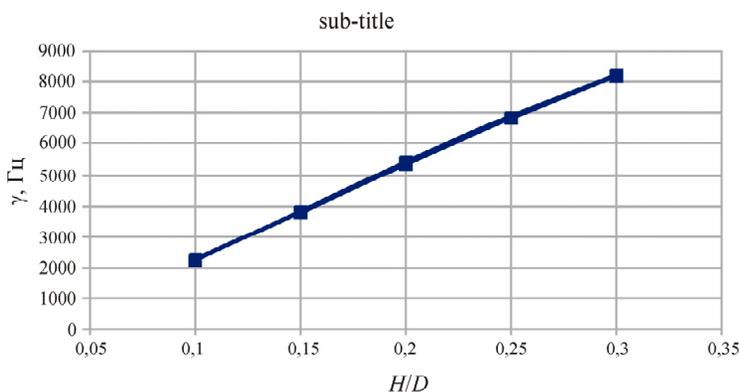


Рис. 6. График зависимости собственной частоты резонатора от отношения высоты диска к диаметру стержня

На третьем этапе был проведен анализ влияния изменения конструкции диска на собственную частоту резонатора. Был рассмотрен ЧЭ с измененной конструкцией диска. На рис. 7 представлен внешний вид ЧЭ, исполненный с одной и пятью волнами на диске. Для первичного анализа и для понимания смысла введения данного изменения достаточно произвести анализ на определение собственной частоты и изменения перемещения ножек конструкций с разным количеством волн (от одной до пяти), с радиусом волны 0,7 мм.

Результаты, полученные в ходе анализа (табл. 3, рис. 8), показывают, что увеличение количества волн на диске уменьшает жесткость резонатора, как следствие, уменьшается собственная частота резонатора и увеличивается перемещение подвижных частей, получившуюся зависимость можно аппроксимировать в линейную.

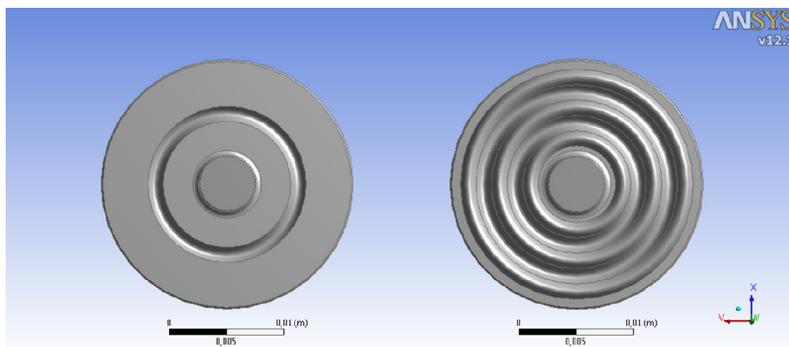
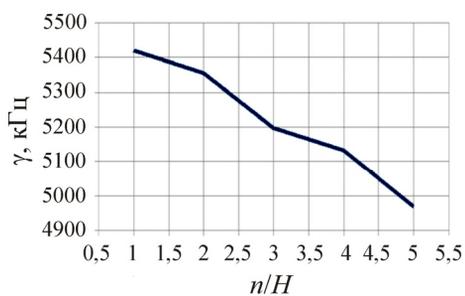


Рис. 7. Измененная конструкция диска чувствительного элемента

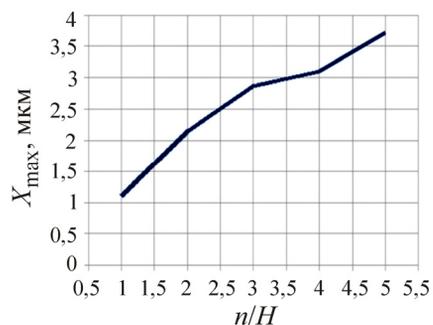
Таблица 3

Результаты анализа влияния числа волн на отклонение ножки и собственную частоту резонатора

Количество волн на диске z	Измеренная собственная частота резонатора γ , Гц	Отклонение ножки резонатора от оси X_{\max} , мкм
1	5420,8	1,1
2	5355,6	2,15
3	5197,5	2,87
4	5131,2	3,1
5	4966,7	3,73



а



б

Рис. 8. Зависимость собственной частоты (а) и амплитуды перемещений ножки резонатора (б) от числа волн на диске чувствительного элемента

На четвертом этапе проводился анализ влияния расположения волны на диске на собственную частоту резонатора. В данной части

рассмотрим изменение параметров ЧЭ при увеличении расстояния волны от оси резонатора (рис. 9). Волна имеет внутренний радиус 0,7 мм. Первоначально задаем расстояние от оси резонатора до центра волны равным 5 мм, затем увеличиваем расстояние на 1,5 и 3 мм соответственно, результаты занесем в табл. 4.

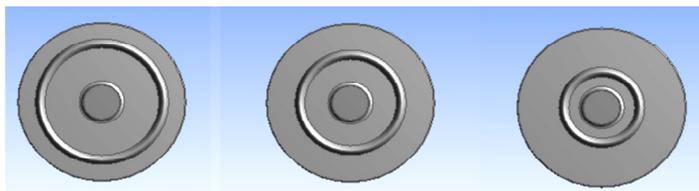


Рис. 9. Расположение волны на диске

Таблица 4

Результаты анализа влияния расположения волны на собственную частоту и отклонение ножки резонатора

Расположение волны	Измеренная собственная частота резонатора γ , Гц	Отклонение ножки резонатора от оси X_{\max} , мкм
Смещена к стержню	5365,9	2,34
В центре	5540,4	1,51
Смещена к торцу	5678,7	0,91

В ходе исследования выяснилось, что с удалением волны от центральной оси резонатора (рис. 10) увеличивается его жесткость, как следствие, увеличивается собственная частота резонатора и уменьшается перемещение ножек соответственно.

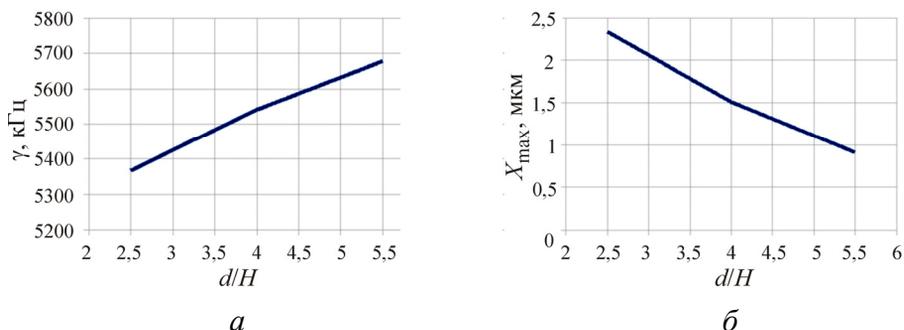


Рис. 10. Зависимость собственной частоты (а) и амплитуды перемещений ножки резонатора (б) от положения волны на диске ЧЭ

На пятом этапе проводился анализ, связанный с изменением высоты диска резонатора в пределах допуска. Рассматривалось изменение параметров резонатора при изменении высоты диска на 3 мкм. Такое отклонение допустимо при производстве, поэтому необходимо проверить погрешность.

Анализ результатов (табл. 5) показал, что изменение высоты диска в пределах допуска оказывает влияние как на собственную частоту резонатора (собственная частота изменяется в среднем на 0,65 %), так и на перемещение ножек (погрешность для этого параметра в среднем 3,7 %).

Таблица 5

Результаты анализа влияния толщины диска на собственную частоту и отклонение ножки резонатора

Толщина диска Н, мм	Измеренная собственная частота резонатора γ , Гц	Отклонение ножки резонатора от оси X_{\max} , мкм
0,997	5521,1	1,85
1	5564,5	1,76
1,003	5594,8	1,72

Оценка напряженно-деформированного состояния ЧЭ ТВГ при разных формах диска показала, что введение трех волн позволяет, с одной стороны, увеличить перемещение ножки ЧЭ в 2,87 раза при толщине диска 1 мм, с другой – обеспечить напряжение в опасных сечениях не более 3,16 МПа. При этом первая мода колебаний будет иметь значение 5197,5, которое удовлетворяет требованиям заказчика.

Заключение

В статье на основе проведенного модального и динамического анализа стержневого ЧЭ ТВГ были определены собственные частоты резонатора, максимальная амплитуда колебаний ножек. При проведении пяти этапов исследования установлены зависимости таких технических параметров ЧЭ, как отклонение ножки резонатора от оси X_{\max} (мкм), собственная частота резонатора γ (Гц) от конструктивных особенностей чувствительного элемента в виде толщины диска, волн на диске, их числа и положения. По полученным значениям можно сде-

лать вывод, что, изменяя жесткость диска, можно увеличить величину отклонения ножки резонатора и тем самым снизить влияние погрешностей изготовления на технические характеристики прибора в целом.

Список литературы

1. Постановка задачи математического моделирования стержневого чувствительного элемента твердотельного волнового гироскопа / М.А. Котельников, А.А. Башарова, П.В. Лекомцев, А.В. Щенятский // Интеллектуальные системы в производстве. – Ижевск, 2016. – С. 69–73.
2. Котельников М.А., Щенятский А.В. Анализ стержневого чувствительного элемента твердотельного волнового гироскопа // Интеллектуальные системы в производстве. – Ижевск, 2016. – С. 189–195.
3. Малеев П.И. Новые типы гироскопов. – Л.: Судостроение, 1971. – 160 с.
4. Селетков С.Г., Иванова С.С. Объект, субъект предмет научно-квалификационной работы // Вестник ИжГТУ. – 2014. – № 1. – С. 175–178.
5. Мартыненко Ю.Г. Тенденции развития современной гироскопии [Электронный ресурс] // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – URL: <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/443.html> (дата обращения: 13.04.2015).
6. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ “Электроприбор”». – СПб., 2009. – 208 с.
7. Bryan G.H. On the beats in the vibrations of a revolving cylinder or bell // Proc. Camb. Phil. Soc. – 1890. – Vol. 7. – P. 101–111.
8. Матвеев В.А., Липатников В.И., Алехин А.В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 168 с.
9. Scott W.B. Delco makes low-cost gyro prototype // Aviation Week. – 1982. – Vol. 117, № 25. – P. 64–72.
10. Лысов А.Н., Виниченко Н.Т., Лысова А.А. Прикладная теория гироскопов. – Челябинск, 2009. – 255 с.
11. Чухланцев Е.С., Щенятский А.В. Исследование нагрузочной способности поликонтактного неравножесткого соединения с натягом численными методами // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – С. 167–170.
12. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: пер. с англ. / под ред. Б.Е. Победри. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
13. Anderson R.G. Finite element engenvalue system. Ph. D. Thesis / Univ. of Wales. – Swansea, 1968.
14. Айроне Б. Задачи о собственных значениях матриц конструкции: исключение лишних переменных // Ракетная техника и космонавтика. – 1965. – Т. 3, № 5. – С. 207.

References

1. Kotel'nikov M.A., Basharova A.A., Lekomtsev P.V., Shcheniatskii A.V. Postanovka zadachi matematicheskogo modelirovaniia sterzhnovego chuvstvitel'nogo elementa tverdotel'nogo volnovogo giroskopa [Problem definition of mathematical modeling

of a rod sensitive element of a solid-state wave gyroscope]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. Izhevsk, 2016, 69–73 pp.

2. Kotel'nikov M.A., Shcheniatskii A.V. Analiz sterzhneвого чувствительного элемента твердотел'ного волнового гироскопа [Analysis of a rod sensitive element of a solid-state wave gyroscope]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. Izhevsk, 2016, 189–195 pp.

3. Maleev P.I. Novye tipy гироскопов [New types of gyroscopes]. Leningrad: Sudostroenie, 1971, 160 p.

4. Seletkov S.G., Ivanova S.S. Ob"ekt, sub"ekt predmet nauchno-kvalifikatsionnoi raboty [Object, subject of scientific and qualification work]. *Vestnik Izhevskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2014, no. 1, 175–178 pp.

5. Martynenko Iu.G. Tendentsii razvitiia sovremennoi гироскопии [Tendencies of development of a modern гироскопия]. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*, 1997, available at: <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/443.html> (data obrashcheniia: 13.04.2015).

6. Matveev V.V., Raspopov V.Ia. Osnovy postroeniia besplatformennykh inertial'nykh navigatsionnykh sistem [Construction bases besplatformennykh of inertial navigation systems]. *Gosudarstvennyi Nauchnyi Tsentр Rossiiskoi Federatsii OAO «Kontsern Tsentral'nyi Nauchno-issledovatel'skii Institut “Elektropribor”»*. Saint-Petersburg., 2009, 208 p.

7. Bryan G.H. On the beats in the vibrations of a revolving cylinder or bell. *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 1890, vol. 7, 101–111 pp.

8. Matveev V.A., Lipatnikov V.I., Alekhin A.V. Proektirovanie volnogo твердотел'ного гироскопа: uchebnoe posobie [Design of a wave solid-state gyroscope: studies. grant]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni N.E. Bauman, 1997, 168 p.

9. Scott W.B. Delco makes low-cost gyro prototype. *Aviation Week*, 1982, vol. 117, no. 25, 64–72 pp.

10. Lysov A.N., Vinichenko N.T., Lysova A.A. Prikladnaia teoriia гироскопов [Applied theory of gyroscopes]. Cheliabinsk, 2009, 255 p.

11. Chukhlantsev E.S., Shcheniatskii A.V. Issledovanie nagruzochnoi sposobnosti polikontaktного neravnozhestkogo soedineniia s natiagom chislennymi metodami [Research of load ability of polycontact neravnozhestky connection with a tightness by numerical methods]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2013, 167–170 pp.

12. Zenkevich O. Metod konechnykh elementov v tekhnike [Method of final elements in the equipment]. Ed. B.E. Pobedri. Moscow: Mir, 1975, 541 p.

13. Anderson R.G. Finite element engenvalue system. Ph. D. Thesis. *Univ. of Wales. Swansea*, 1968.

14. Airone B. Zadachi o sobstvennykh znacheniiakh matrits konstruksii: iskluchenie lishnikh peremennykh [Eigenvalue problems of matrixes of construction: exception of excess variables]. *Raketnaia tekhnika i kosmonavtika*, 1965, vol. 3, no. 5, 207 p.

Получено 24.04.2017

Об авторах

Щенятский Алексей Валерьевич (Ижевск, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры мехатронных систем Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова; e-mail: bkkupol@istu.ru.

Котельников Михаил Александрович (Ижевск, Россия) – магистрант кафедры мехатронных систем Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова; e-mail: mixailkotelnikov@mail.ru.

Башарова Анна Александровна (Ижевск, Россия) – магистрант кафедры мехатронных систем Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова; e-mail: phoenix-anya@mail.ru.

About the authors

Aleksey V. Shchenyatski (Izhevsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Mechatronic Systems, Kalashnikov Izhevsk State Technical University; e-mail: bkkupol@istu.ru.

Mikhail A. Kotelnikov (Izhevsk, Russian Federation) – Master Student, Department of Mechatronic Systems, Kalashnikov Izhevsk State Technical University; e-mail: mixailkotelnikov@mail.ru.

Anna A. Basharova (Izhevsk, Russian Federation) – Master Student, Department of Mechatronic Systems, Kalashnikov Izhevsk State Technical University; e-mail: phoenix-anya@mail.ru.